

論文 無機系被覆工法に生じた乾燥収縮ひび割れが凍結融解抵抗性に及ぼす影響の検証

河合 正憲*1・石神 暁郎*2・筏津 春花*3・緒方 英彦*4

要旨：積雪寒冷地におけるコンクリート開水路では、凍害劣化を対象とした補修が進められている。このうち、無機系被覆工法は乾燥収縮ひび割れが発生しやすいが、凍結融解抵抗性に及ぼす影響は不明である。そこで本研究では、無機系被覆工法による補修が施工された開水路側壁から採取したコアを用いて凍結融解試験を実施し、超音波伝播速度の測定およびマイクロスコープを用いてひび割れの観察を行った。その結果、PCM ではひび割れの有無によらず通水面側で超音波伝播速度の低下は見られず、補修材のひび割れの進展が見られなかったことから、発生した乾燥収縮ひび割れの及ぼす影響が小さい可能性が示された。

キーワード：コンクリート開水路, PCM, HPRFCC, 凍結融解試験

1. はじめに

北海道をはじめとする積雪寒冷地におけるコンクリート開水路では、農業にとって欠かすことの出来ない水が劣化因子とされる凍害が発生している。近年、凍害劣化を対象とした補修が進められてきており、無機系の補修材料を用いた表面被覆工法が適用される場合が多いが、無機系被覆工法は乾燥収縮によるひび割れが発生しやすいとされ、現地で施工された無機系被覆工法の多くで乾燥収縮によると推測されるひび割れが確認されている(写真-1 参照)。

補修材は、JISA 1148 (A 法) に基づいて照査され、300 サイクル後の相対動弾性係数が 85%以上と、凍結融解抵抗性を有した材料が使われている。しかし、既往の研究²⁾では、材料として凍結融解抵抗性を有するコンクリートを使用した場合でも、凍結時の膨張圧によってひび割れが大きく開口・進展することが報告されており、補修材の割れが進展することで、母材コンクリートに影響を与える場合、補修以外の対策も含めた検討が必要となる。

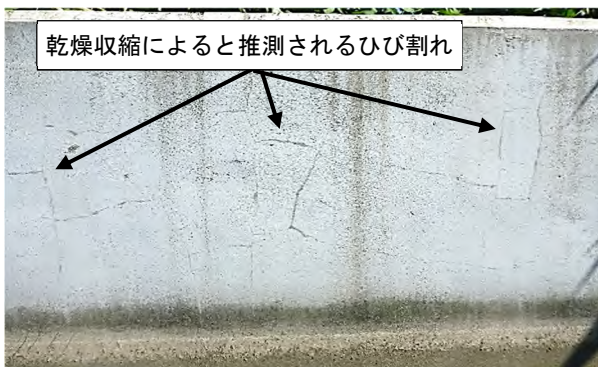


写真-1 無機系被覆工法に生じた乾燥収縮ひび割れ

そこで本研究では、無機系被覆工法が施工されて 6 年が経過した開水路側壁から採取したコアを用いて凍結融解試験を行い、被覆されている通水面から深さ毎の超音波伝播速度の推移およびひび割れの状態を観察することで、無機系被覆工法に生じた乾燥収縮ひび割れが及ぼす影響を検証した。

2. 検証方法

既往の研究³⁾では、促進劣化試験である凍結融解試験により、現地から採取したコアの凍結融解抵抗性を評価している。そこで本研究でも同様に、現地から乾燥収縮ひび割れを含むコア(φ100×200mm)を採取し、JIS A 1148 (A 法) に準拠して、凍結融解試験を行い、無機系被覆工法に生じた乾燥収縮ひび割れが凍結融解抵抗性に及ぼす影響を検証することとした。

2.1 対象施設の概要

対象施設は、北海道空知地方の美唄市に位置する農業用のコンクリート開水路で、灌漑期間は 5 月の上旬から 8 月下旬までで、非灌漑期に水は流れない。また、施設の規模は、内幅 2.5m、内高 1.5m、側壁の部材厚は 200mm である。

当該区間は、1988 年度に建造され、側壁上部の背面が大気中に曝されているのに対し、側壁下部は背面土に接した環境にある。その後、2018 年度に通水面の側壁部のみ、PCM (ポリマーセメントモルタル) および HPRFCC (複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料) による補修が施工されている(被覆厚は図-7 に示す)。なお、いずれの材料も高炉スラグ系混和材が配合され、300 サイクル後の相対動弾性係数は 97%(PCM) と 98%(HPRFCC)

*1 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地農業基盤研究グループ 水利基盤チーム 研究員 (正会員)

*2 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地農業基盤研究グループ 水利基盤チーム 主任研究員 博士(農学) (正会員)

*3 鳥取大学大学院 連合農学研究科 国際乾燥地科学専攻 修士(農学) (学生会員)

*4 鳥取大学大学院 連合農学研究科 教授 博士(農学) (正会員)

C)であり、いずれも凍結融解抵抗性を有している。

2.2 検証方法の概要

(1) コア採取の概要

コアの採取は JIS A 1107 に準拠して行った。コアの採取位置の選定にあたり目視にてひび割れの発生状況を確認したところ、両岸の側壁において最多頻度水位（灌漑期間中最も多く発生する水位）より上で発生していた。

（以後、最多頻度水位より上部を気中部、下部を水中部とする。）既往の研究⁴⁾において、日射を受ける面ではコンクリートの温度が上昇し、凍結融解作用を受けやすくなることが報告されていることから、凍結融解作用の影響が少ないことが想定される日射面とは反対の側壁から採取することとし、PCM および HPRCC の気中部と水中部からコアを採取した。また、比較対象として無補修からもコアを採取した。コア採取位置の概要を図-1 に、採取したコアの通水面の外観や性状、以後の名称を略記にて表-1 に示す。なお、HPRCC については、H-2 をコア採取時点でひび割れ無しとしていたが、その後のマイクロスコープカメラによる観察でひび割れが確認されたため、HPRCC においてひび割れの有・無による比較はできないことになった。

(2) 凍結融解試験の概要

凍結融解試験を行うにあたり、留意した点等を以下に示す。

まず、実暴露環境を想定し、コアに対する水分の供給がコンクリート開水路の通水面および背面からとなるように、表面被覆材を含めた側面にエポキシ樹脂によるシールを行った（写真-2 参照）。

次に、JIS A 1148 6.1.1 において、角柱供試体を入れる容器の一例が示されている。本研究では、採取したコアの形状が円柱であるため、コア容器も円柱型とし、凍結融解中常に約 3mm 厚の水でコアの全面が覆われるように内面に突起部をもつゴム製のものを用いた。

また、JIS A 1148 6.1.2 において、試験するコンクリートと温度変化のほぼ等しくなるコンクリートで作った温度管理用供試体中心部の温度で凍結融解温度の管理を行うとされている。本研究では、円柱のコアを用いて凍結融解試験を行うことから、試験時の温度管理はφ100×400mm の管理用供試体を作製し、その中心温度で行った（0～120 サイクルまで）。ただし、121 サイクル以降は他の試験を併用して行うため、75×75×400mm の管理用供試体の中心温度で行った。このため、試験に使用するコアと同じ形状寸法で、中心部に T 型熱電対を埋設した模擬供試体を作製し、温度履歴などを確認した。その結果、温度履歴は 5±2℃ から -18±2℃ の範囲内で推移し、凍結融解 1 サイクルに要する時間は 3 時間以上 4 時間以内と、JIS A 1148 (A 法) の条件内に収まっていることを確

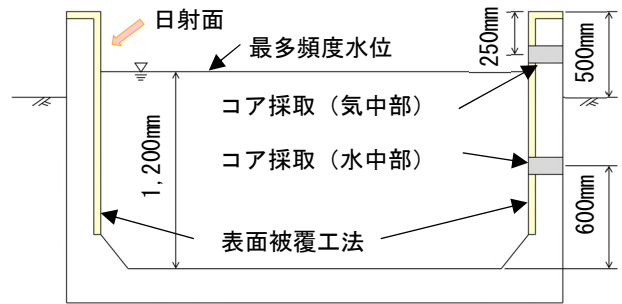


図-1 コア採取位置図

表-1 各コアの通水面側の外観

U-1(気・無)	U-2(水・無)	P-1(気・有)
無補修, 気中部, ひび割れ無し	無補修, 水中部, ひび割れ無し	PCM, 気中部, ひ び割れ有り
P-2(気・無)	P-3(水・無)	H-1(気・有)
PCM, 気中部, ひ び割れ無し	PCM, 水中部, ひ び割れ無し	HPRCC, 気中部, ひび割れ有り
H-2(気・有)	H-3(水・無)	
HPRCC, 気中部, ひび割れ有り	HPRCC, 水中部, ひび割れ無し	



写真-2 コアのシール状況 (例: H-1)

認した (図-2, 図-3 参照)。

最後に、容器内のコアの配置では、温度管理用供試体の長さとはほぼ等しくなるようにコアの上下にポリマーセメントモルタルで作製した間詰材を配置するとともに、

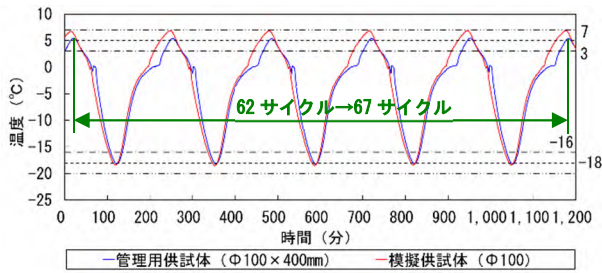


図-2 凍結融解温度の履歴 (0~120 サイクル)

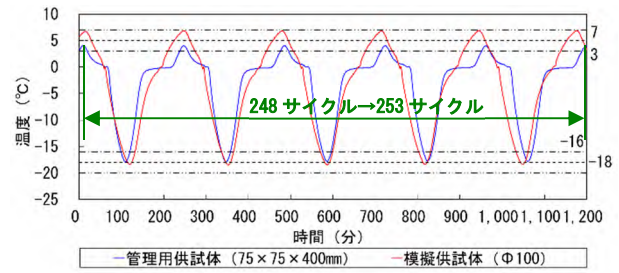


図-3 凍結融解温度の履歴 (121 サイクル以降)

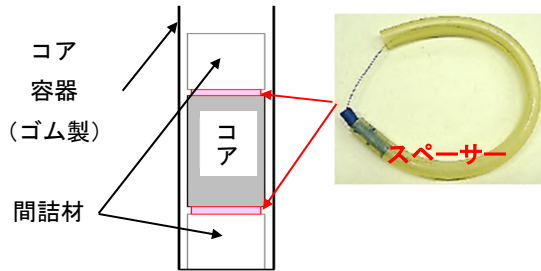


図-4 コア配置概要

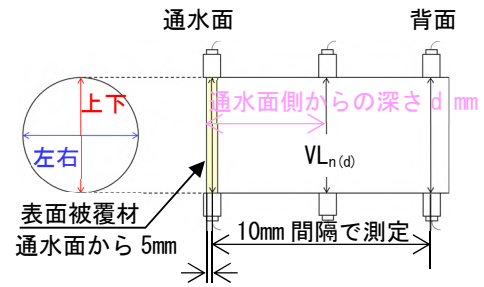


図-5 超音波法 (透過法) 測定概要

通水面および背面から水分供給が行われるように、コアと間詰材の間にスペーサーとしてポリプロピレン製のチューブを配置した (図-4 参照)。

なお、凍結融解試験の終了は、JIS A 1148 6.2.4 に準拠し、300 サイクル終了時としたが、コアの劣化の進行に伴い、容器内に収まらなくなった段階で当該コアの試験を終了した。

(3) 測定方法の概要

JIS A 1148 による凍結融解試験では、一次共鳴振動数が測定項目とされているが、供試体の深さ毎の測定は出来ない。そこで本研究では、既往の研究⁹⁾において、超音波伝播速度を直接用いても十分に凍結融解抵抗性の評価が行えるとされていることから、コンクリートの診断手法として多くの実績を有する超音波法 (透過法) で測定した超音波伝播速度を判定指標とした。ここで相対超音波伝播速度とは、凍結融解試験開始前に測定した超音波伝播速度とサイクル数 n の超音波伝播速度との比の二乗であり、式(1)で求められる。

$$\text{相対超音波伝播速度(\%)} = VL_n^2 / VL_0^2 \times 100 \quad (1)$$

ここに、 VL_n : サイクル数 n の超音波伝播速度 (km/s)、 VL_0 : 凍結融解試験の開始前に測定した超音波伝播速度 (km/s) である。

各サイクル終了後、超音波試験機 (P 社製 TICO 型) を用いて、通水面を基準に深さ方向に 5mm の位置から 10mm 間隔で 195mm の位置まで超音波伝播速度を測定した (図-5 参照)。なお、測定周波数は 54kHz である。このとき、同じ深さで上下・左右の 2 測線で 1 回ずつ測定した平均値を深さ d mm における超音波伝播速度とし、深さ d における相対超音波伝播速度を式(2)より求めた。

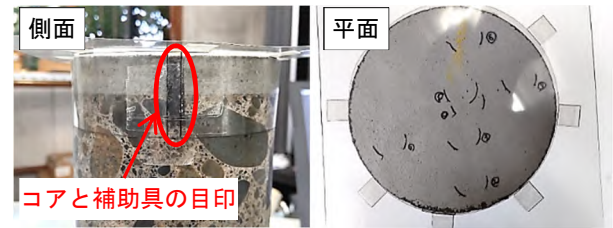


写真-3 観察用補助具設置状況 (例: H-2)

深さ d mm における相対超音波伝播速度(%)

$$= VL_{n(d)}^2 / VL_{0(d)}^2 \times 100 \quad (2)$$

ここに、 $VL_{n(d)}$: 深さ d mm におけるサイクル数 n の超音波伝播速度 (km/s)、 $VL_{0(d)}$: 深さ d mm における凍結融解試験の開始前に測定した超音波伝播速度 (km/s) である。

(4) ひび割れ観察の概要

ひび割れの観察は、各サイクル終了後に、マイクロ스코プ (T 社製) を用い、焦点距離 3mm (倍率 180 倍) で行った。観察にあたり、OHP 用紙で補助具を製作し、側面はコアと補助具の双方に目印をつけ、平面は補助具のみ目印をつけて、同じひび割れを定点観測できるようにした (写真-3 参照)。なお、ひび割れ観察の終了は、コアの劣化の進行に伴い、補助具がコアに入らなくなった時点、あるいは、観察していたひび割れが識別不能になった時点とした。

3. 検証結果

3.1. 超音波伝播速度の推移

図-6 に各コアの凍結試験開始前の超音波伝播速度を示す。健全なコンクリート中の音速は約 4,000m/s⁹⁾ とされ、P-1(気・有)、P-2(気・無)において背面が若干下回っ

ているものの、いずれのコアも健全な状態にあった。

図-7 に各コアの各測定サイクルにおける深さ方向の相対超音波伝播速度の推移を示す。

無補修については、U-1(気・無)において露出している通水面および背面の両面で劣化の進行が確認できるが、U-2(水・無)では通水面において若干の劣化の進行は見られるものの背面では見られない。図-1 に示すように、背面の状況は気中部において大気中に曝されており、水中部において背面土に接している。大気中に曝されている面では、乾湿繰返しおよび凍結融解作用の繰返しを受けることでコンクリートの耐久性が低下しやすくなり、また流水に接する通水面ではカルシウムの溶脱⁹⁾等が生じることから、これらが関係しているものと考えられる。

PCM については、P-1(気・有)、P-2(気・無)の結果からひび割れの有無に関係なく、被覆されている通水面での劣化が確認できず、無補修では劣化の進行が確認された深さ 100mm までの区間においても劣化の進行がほぼ確認されない。この傾向は、既往の研究⁹⁾にあるとおり

水分を透過し難い性質を示している。

一方、HPFRCC については、H-1(気・有)、H-2(気・有)の結果から、補修材と母材界面の境界よりも以深において劣化が進行する傾向が確認できる。また、HPFRCC 自体も劣化が進行しており、PCM と比較して水分が透過しやすく、表面近傍に水分を保持しやすい⁹⁾ことが要因と考える。今回は、HPFRCC においてひび割れ無しのコアが採取できなかったことから本論文だけで言及することはできないが、補修材にひび割れが発生している場合、凍結融解抵抗性に及ぼす影響は、PCM よりも HPFRCC

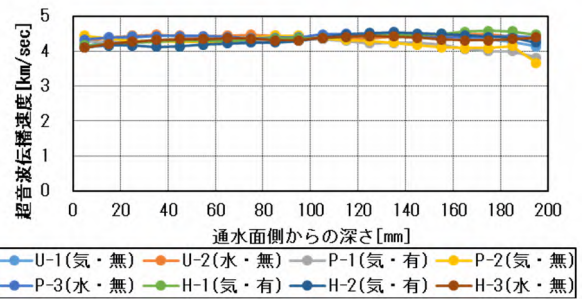


図-6 深さ方向の超音波伝播速度 (0 サイクル)

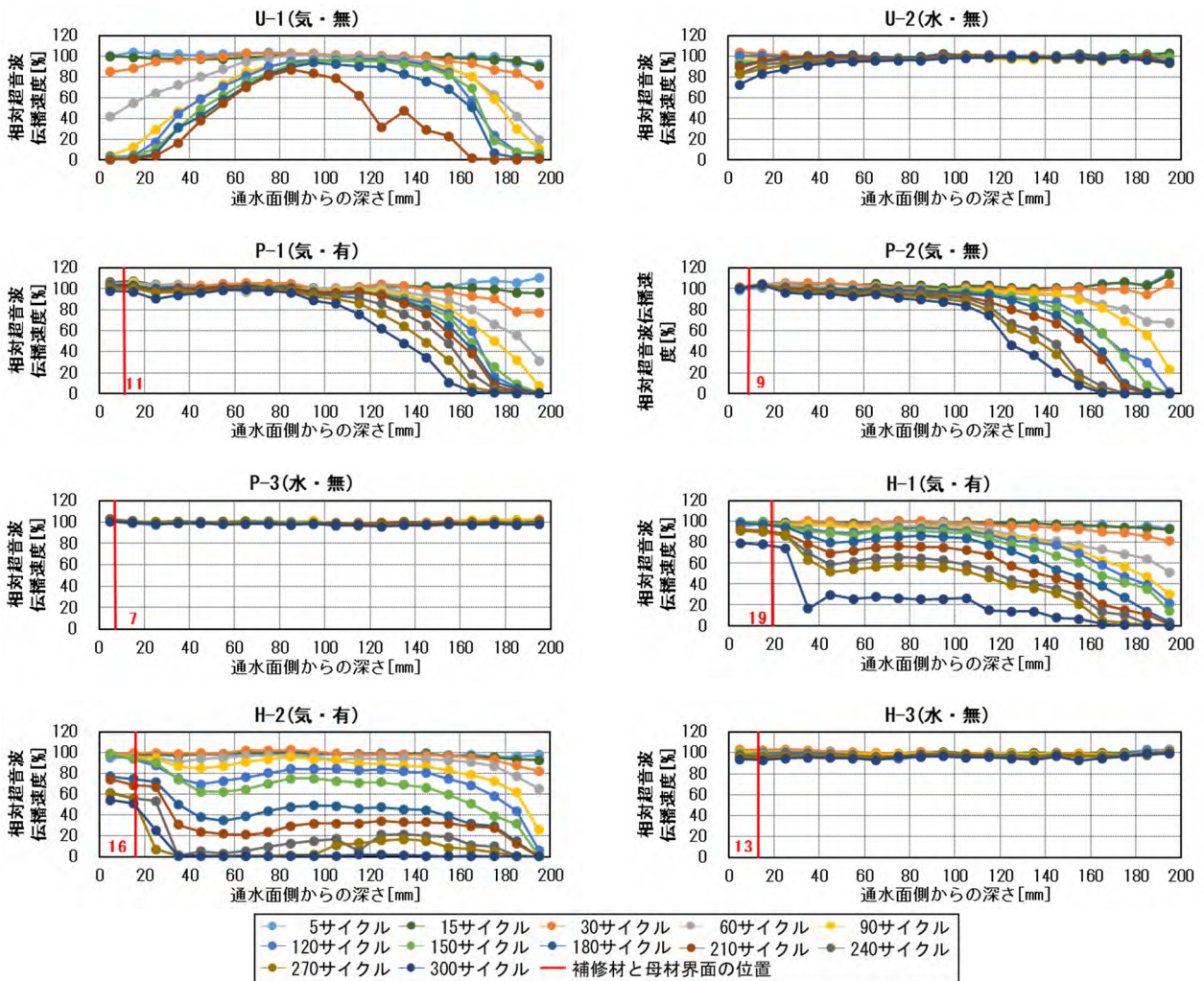







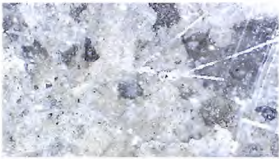
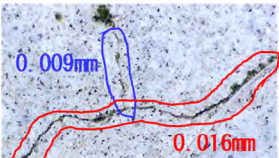
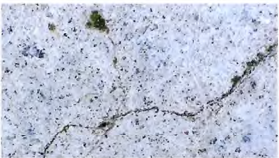








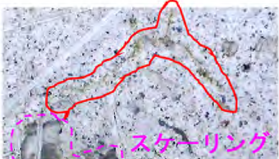


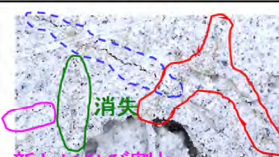






図-7 通水面から深さ方向の相対超音波伝播速度の推移

表-2 ひび割れの観察結果の一例

P-1(気・有)				
				
0サイクル	30サイクル	60サイクル	90サイクル	
				
150サイクル	240サイクル	270サイクル	300サイクル	
H-1(気・有)				
				
0サイクル	30サイクル	60サイクル	150サイクル	
				
180サイクル	210サイクル	270サイクル	300サイクル	
H-2(気・有)				
				
0サイクル	30サイクル	60サイクル	90サイクル	
				
120サイクル	150サイクル	180サイクル	210サイクル	
				
240サイクル	270サイクル			

が高い可能性が示唆される。

水中部にあるPCMのP-3(水・無)とHPFRCCのH-3(水・無)は、ほぼ劣化が進行せず、凍結融解抵抗性が高い。これは、無補修であるU-2(水・無)の結果からも、水中部に

おける母材コンクリートの凍結融解抵抗性が高く¹⁰⁾、通水面の劣化部が補修材に置換されているため、通水面および背面から侵入する水が少ないからであると考えられる。つまりは、HPFRCCの気中部において、劣化が進行したのは、補修材に発生しているひび割れだけではなく、背面から凍結融解抵抗性が低い母材コンクリートに浸透した水も関係していると考えられる。

3.2. ひび割れ観察の結果

ひび割れ観察の結果の一部を表-2に示す。

P-1(気・有)では、凍結融解試験開始前に析出物が見られたひび割れと見られなかったひび割れを示している。析出物が見られなかったひび割れは 60 サイクルまで、見られたひび割れは 270 サイクルまで識別することが出来たが、いずれのひび割れも長さおよび幅の進展はなかった。

H-1(気・有)では、異なる幅のひび割れを示している。ひび割れ幅 0.009mm は 180 サイクルで識別出来なくなり、ひび割れ幅 0.016mm は 300 サイクルでもその一部分を識別することが出来たが、P-1 と同様に長さおよび幅の進展はなかった。

H-2(気・有)では、凍結融解試験前に確認されたひび割れ近傍に、試験途中に新たなひび割れやスケーリングが確認された例である。試験前に確認されたひび割れは、P-1(気・有)および H-1(気・有)と同様の傾向であったのに対し、新たに発生したひび割れは進展することが確認された。

サイクル数の増加に伴い、ひび割れが識別しにくくなった要因としては、水は凍結した際に膨張圧を発生させるが、高炉スラグの特性でもある硬化体の組織が緻密化されている¹⁾ため、ひび割れ近傍の脆弱部のみ剥離されたことにより、ひび割れ自体識別しにくくなるとともに、深さ方向に進展しなかったものと考えられる。

また、新たなひび割れやスケーリングが発生した要因としては、当該水路は図-1 に示すとおり、通水面および背面が気中に曝されている環境であることから、乾湿繰返しを受けることで耐凍害性が低下し⁷⁾、PCM と比較して水分を保持しやすい⁹⁾ため、内部に含んだ水分の凍結膨張圧によるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、無機系被覆工法に生じた乾燥収縮ひび割れが凍結融解抵抗性に及ぼす影響を検証するために、コンクリート開水路側壁から採取したコアを用いて凍結融解試験を行った。その結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) 気中部におけるひび割れ有りの PCM のコアは、被覆されている通水面での劣化が確認できず、無補修では劣化の進行が確認された深さ 100mm までの区間においても劣化の進行がほぼ確認されなかった。また、凍結融解サイクルの進行に伴うひび割れの進展も認められなかったことから、ひび割れが及ぼす影響が小さい可能性が示された。
- (2) 気中部におけるひび割れ有りの HPRCC のコアは、補修材と母材界面の境界よりも以深において劣化が進行する傾向が確認できた。また、凍結融解サイクルの進行に伴うひび割れの進展が認められるコアもあった。

- (3) 気中部において補修材にひび割れが発生している場合、凍結融解抵抗性に及ぼす影響は、PCM よりも HPRCC が高い可能性が示唆された。
- (4) PCM と HPRCC のコアの両者とも、水中部では劣化がほぼ進行せず、凍結融解抵抗性が高い傾向にある。

参考文献

- 1) 農林水産省農村振興局整備部設計課：農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路編】，pp.113-114，2023.5
- 2) 内藤英樹，林 弘，齊木佑介，山洞晃一，古賀秀幸，鈴木基行：初期ひび割れを有するコンクリートの凍結融解抵抗性に関する基礎的研究，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)，Vol.67，No.3，pp.436-450，2011.9
- 3) 西田真弓，石神暁郎，緒方英彦：寒冷地におけるコンクリート開水路における表面保護工法適用後の補修効果の検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.833-838，2019.7
- 4) 佐藤 智，金田敏和，石神暁郎，周藤雅司，緒方英彦：RC 開水路の目視による凍害診断の留意点，農業農村工学会誌，Vol.81，No.2，pp.117-120，2013.2
- 5) 緒方英彦，服部九二雄，高田龍一，野中資博：超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1563-1568，2002.6
- 6) 社団法人日本非破壊検査協会：コンクリート構造物の非破壊試験法，養賢堂，p.114，1994
- 7) 千歩 修，濱田英介，友澤史紀：乾湿繰返しがコンクリートの吸水性状と耐凍害性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.731-736，2003.7
- 8) 森 充広，渡嘉敷勝，山崎大輔，加藤智丈：長期供用された農業用水路のコンクリート通水表面の変質，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.919-924，2009.7
- 9) 石神暁郎，南 真樹，金沢智彦，緒方英彦，濱 幸雄：無機系補修工法における付着性による耐凍害性の評価，農業農村工学会論文集，No.318(92-1)，pp. II_27-II_39，2024.6
- 10) 吉田 行，嶋田久俊，水田真紀，田口史雄：耐凍害性への養生の影響と評価手法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.943-948，2013.7
- 11) 高炉スラグ微粉末～CO2 削減に貢献する混和材～：https://www.jci-net.or.jp/j/concrete/technology/202203_article_1.html (閲覧日：2025 年 3 月 21 日)